

基于推挽式供电和 PID 温控的 半导体冰箱系统设计

吴迪, 曾国辉, 丁倩云

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 随着科技的发展, 半导体制冷技术已经广泛的应用于军事、医疗、日常生活等方面; 然而现有半导体冰箱的制冷技术由于热端与冷端不能像金属那样分离, 存在着恒温效果差和制冷效率低等问题; 针对上述问题, 根据帕尔帖效应, 采用推挽式供电方式和 PID 温控的方法设计出了一种半导体冰箱, 并且设计了 3 种制冷强度: 高档、中档和低档; 最终实验结果表明, 给出设定温度和制冷强度, 该冰箱可以在工作一段时间后使温度稳定在温度设定值, 上下浮动不超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而且所用时间与预期相符合。

关键词: 半导体; 推挽式; PID; 帕尔帖效应

Semiconductor Refrigerator System Design Based on Push-pull Power Supply and PID Temperature Control

Wu Di, Zeng Guohui, Ding Qianyun

(School of Electric and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the development of science and technology, the semiconductor refrigeration technology has been widely used in military, medical, daily life and so on. However, in the existing refrigeration technology of the semiconductor refrigerator, since the hot end and the cold end cannot be separated like metal, there are problems like that the constant temperature effect is poor and the cooling efficiency is low and so on. To solve the above problems, according to the Peltier effect, a semiconductor refrigerator was designed using a push-pull power supply method and PID temperature control method, and three kinds of refrigeration strengths were designed: high grade, middle grade, and low grade. The final experimental results showed that, given the set temperature and refrigeration strength, the refrigerator can stabilize the temperature at the temperature set value after working for a period of time, and the fluctuation does not exceed $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the time used is in line with the expectation.

Keywords: semiconductor; push-pull; PID; peltier effect

0 引言

从世界冰箱技术的鼻祖 Carl Munters 和 Baltzar von Platen 发明了吸收式制冷技术以来, 至今绝大多数制冷技术一直没有跳出法国工程师尼古拉·莱昂纳尔·萨迪·卡诺于提出的卡诺循环^[1] (Carnot cycle) 的 4 个步骤: 等温吸热, 绝热膨胀, 等温放热, 绝热压缩, 所以压缩机的噪音与功耗一直是悬而未决的难题, 包括滚珠式压缩机在内。文献^[2] 提出利用冷凝管对半导体冰箱散热方式进行改进, 最终实现对半导体冰箱制冷效率的提高; 文献^[3] 通过测试在风冷、循环水和恒温水条件下的制冷性能, 最终建立水

冷式半导体冰箱的制冷模型; 文献^[4] 使用双限值控制方法, 控制半导体制冷器、风机、水泵等执行机构工作, 实现对半导体制冷式果蔬配送箱保鲜环境的温度调控和散热系统高温保护。

本次设计的半导体冰箱跳出了传统冰箱的设计方法, 借鉴卡诺循环的 4 个步骤, 也设计了 4 个步骤: 主动充电, 放电回收, 被动放热, 吸热恢复。但是在长期研究半导体的过程中发现始终有两个原因限制了半导体制冷的工作效率: 一方面, 给半导体通电时, 二极管里的电阻会消耗的一部分的效率; 另一方面, 半导体冷面和热面之间的环氧树脂在实际中无法做到绝对绝热, 同样降低了工作效率。为了解决这两个问题, 采用了推挽式供电方式和 PID 温控的方法对所设计系统进行改进与控制, 最终实验结果表明所设计半导体冰箱系统具有良好的恒温效果和较高的制冷效率。

1 半导体制冷原理

1834 年, 法国物理学家帕尔帖在铜丝的两头分别接了

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(GCKY2014408C001)。

作者简介: 吴迪(1992-), 男, 河南禹州人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式开发和大数据开发方向的研究。

曾国辉(1975-), 男, 江西人, 博士, 研究生导师, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动、电机拖动及控制等方面的教学与科研工作。

一根铂丝，再将这两根铂丝分别接到直流电源的正、负极上，通电后发现一端发热，一端变冷，这种现象称为帕尔帖效应，它是热电制冷的依据^[5]。

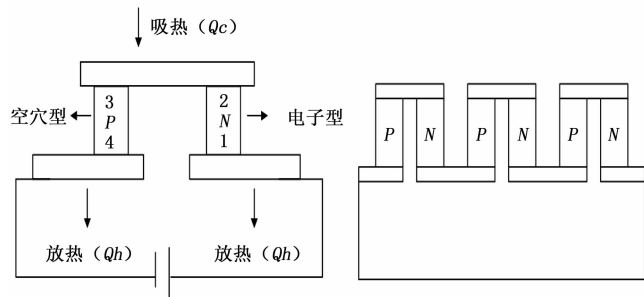


图 1 制冷片工作原理

图 1 是由一块 N 型半导体和一块 P 型半导体连接成的电偶通上直流电后制冷情况。由于 N 型半导体内的载流子和 P 型半导体内的载流子与金属片中载流子的势能不同，一定会在半导体材料和金属片的接点上发生能量传递和转换。因为空穴在 P 型半导体内具有的势能高于其在金属片内的势能，在外电场作用下当空穴通过节点 3 时，需要从金属片中吸取一定的热量，用以提高自身的热能才能进入 P 型半导体内。因而 3 处温度就会降低形成冷节点。当空穴通过节点 4 时，需要将多余的一部分热能留给节点，才能进入到金属片中，这是节点 4 处温度升高，形成热节点。同理，在外电场作用下电子通过热电偶回路，也将引起节点 2 降温形成冷节点，节点 1 升温形成热节点。这就是半导体制冷的本质。

2 系统硬件设计

对于冰箱系统来说，制冷和加热模块的选择直接决定了其恒温控制效果的好坏，下面首先对两种方案制冷加热方案进行比较。

第一种方案：半导体+散热风扇：

系统同时具有降温和加热功能，半导体芯片依据帕尔帖效应，当直流电通过两种不同的半导体构成的电路时，节点金属片接头释放热量，最终通过改变电流方向来实现冷却和加热。半导体制冷片功耗低、结构简单、故障率低、没有振动、没有噪声。散热风扇有助于冰箱箱内的降温，并且智能节能，使半导体工作更加有效率。

第 2 种方案：压缩机+辅助电加热：

压缩机是传统冰箱采用的技术，虽然它有着制冷效率高，能冷冻、保鲜以及体积大容量大的优点，但是使用压缩机的缺点也同样比较明显：体积大、重量大、不易搬运、不利于环保使用成本高（耗电）而且购买价格比较高。同时还采用陶瓷电加热，主要是由陶瓷材料镍铬合金丝组成，实现对温度的升高。加热和降温的功能是分开的，并且本身不易进行自动化控制。

因此，通过对上述两种方案的优缺点对比，最终选择

第一种方案，即采用半导体和散热风扇作为系统硬件设计的核心部件。本设计是以 STM32 微控制器为核心的恒温控制系统。系统主要包括：温度采集模块、继电器模块、电机驱动模块、制冷片控制模块、散热风扇控制模块。系统硬件框图如图 2 所示。

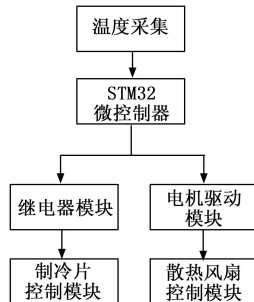


图 2 系统硬件框图

首先，由 DS18B20 温度传感器采集实时的温度并以数字信号的形式传入单片机，然后将采集到的实际温度和理想温度作对比，最后 STM32 微控制器通过输出 PWM 脉冲信号来控制继电器进而实现对制冷片的温度控制。基于同样的原理，STM32 微控制器通过输出 PWM 脉冲信号来控制散热风扇的转速来给半导体冰箱进行散热，以达到最佳的恒温效果。

2.1 推挽式供电控制电路

STM32 微控制器输出 PWM 脉冲调制信号控制继电器，通过继电器实现对制冷片变电压制冷的功能。采用推挽式供电^[6]方式，给两个制冷片供电以提高制冷效率，控制电路如图 3 所示。

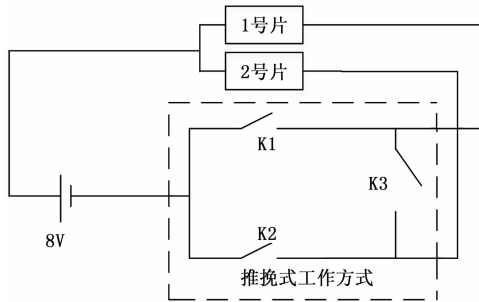


图 3 推挽式供电控制电路

2.2 散热模块

本系统采用的散热风扇是直流电机驱动的，其驱动电压是 12V 的直流电压。在电压不超过 12V 的情况下，缩短高电平时间可以减慢散热器的转速，增加高电平时间可以加快转速。因此设计过程中可以采用 PWM 的方式来对电机进行速度控制，只要 PWM 的频率合适就能够像直流电压一样控制直流电机的转速。为了使得单片机输出的 PWM 信号可以驱动电机，本系统将 PWM 经过电机驱动模块后，对散热风扇的转速进行控制。电机驱动模块原理如图 4 所示。

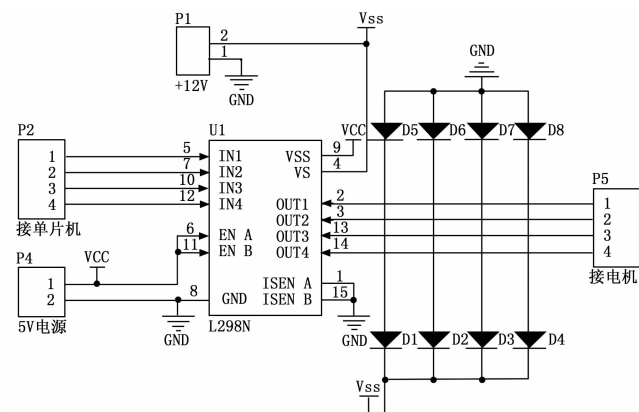


图 4 电机驱动电路

2.3 温度采集模块

本系统设计温度采集的目的是实时的读取散热片上的温度, 以及适时地调整散热风扇的转速, 从而达到最好的散热效果。因为人的极限感温能力为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 根据实际情况, 系统采用精度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数字温度传感器—DS18B20。它工作电压范围宽, 为 $3.3\sim 5\text{ V}$, 检测温度范围在 $-55\sim +125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度可达 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。具有与众不同的单线接口方式, 仅通过一条线就能够实现 MCU 与 DS18B20 之间的双向通讯。温度传感器 DS18B20 将采集到的温度以数字输出的方式传入单片机, CRC 校验码可一起传输, 抗干扰纠错能力非常强^[7]。

为了系统硬件的统一性和兼容性, 设计中采用了模块化的硬件设计模式, 将温度采集设计为单独的模块, 通过串口输出温度数据, 以便供其他设备读取温度数据。这样设计的好处是主机不用关心使用的是何种温度传感器, 何种硬件, 只需要读取输出的串口数据即可得到温度数据。另外, 改成其他的温度传感器也可以不用修改单片机端的软件代码, 大大方便了硬件系统的移植性^[8]。设计的模块通过串口输出温度数据, 为什么选择串口是因为通常需要采集温度的地方可能离数据处理单元比较远, 几米或者更远, 在 15 米范围内可以使用异步串口通信来传输数据, 超过 15 米的通讯距离就需要考虑 RS485 通信或者网络通信的方式来传输数据^[9]。

2.4 继电器模块

继电器是一种非常常见的开关元件, 具有操作方便, 能当成理想开关器件的特性。但是缺点也是明显的, 开关响应慢, 通常是百 ms 级的响应速度, 而且驱动继电器的开关需要比较高的电压, 与单片机的 TTL 电平是不匹配的, 但是可以通过驱动电路来解决。考虑到本次设计中对制冷片的推挽式变压供电控制不需要很快频率的开关速度, 所以使用继电器是非常合理的一个方案。

本设计采用一路 5 V 继电器模块, 具有高低电平触发方式。跳线与 HIGH 短接时为高电平触发: 高电平触发指的是用 VCC 端的正极电压与触发端连接的一种触发方式,

当触发端有正极电压或达到触发的电压时, 继电器则吸合。跳线与 LOW 短接时为低电平触发, 低电平触发指的是用 GND 端的负极电压与触发端连接的一种触发方式, 当触发端有 0V 电压或电压低到可以触发时, 继电器则吸合。

3 系统软件设计

软件设计的主要流程是首先利用温度传感器模块获取散热片的温度, 之后单片机解析出实际的温度, 然后与理想的温度值作对比, 最后通过 PID 算法来控制散热器的转速或者继电器对制冷片供电, 将制冷片的温度控制在一定范围内。PID 算法能够对系统温度的控制做出合理的判断, 通过比例、积分、微分对误差进行计算从而得到当前最合适的控制值来调节系统温度。系统软件流程图如图 5 所示。

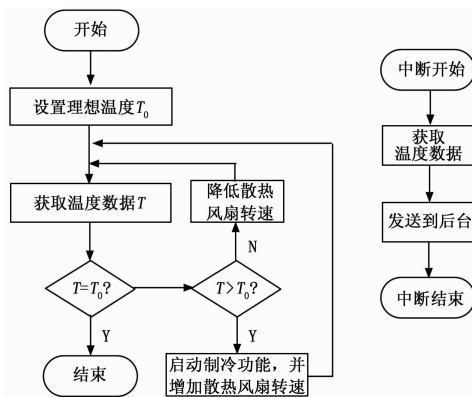


图 5 系统软件流程图

3.1 推挽式供电算法

本系统的半导体冰箱为小型冰箱, 根据实际情况, 将制冷强度分为低冷(节能冷)、中冷和强冷三档。低冷的目的是节约能源, 到达理想的制冷温度需要 2 小时; 需要快速制冷的情况下, 可以调节到强冷档, 半小时就可以满足需求, 缺点是耗电太快; 一般工作状态保持在中冷, 1 小时可达到理想制冷温度。

基于 Fourier Transform^[10]的理论, 使各谐波分量尽可能的小, 计算出大概的制冷时间。再通过实验, 找到最佳的制冷时间, 以达到最佳效果。本设计采用推挽式供电方式, 以提高半导体的冷热分离效率。3 个继电器的打开时间分别定义为 t 秒、 δ 秒和 r 秒。将继电器 K1 的打开时间 t 分别设为 10、20、30 秒这 3 个低、中、高三档; 继电器 K2 打开时间 δ 设定在 $0\sim 32$ 秒的可变范围内。通过输出的脉冲信号, 根据图 6 的时序依次控制继电器的启停。

3.2 恒温 PID 算法

本系统采用 PID 算法主要是将传感器采集到的温度和理想温度进行对比, 将温差反馈给单片机, 根据情况进行制冷或者调节散热风扇转速, 提高恒温系统的性能。

PID 算法是控制理论中非常重要的算法^[11]。如何稳定又高效的控制温度, 采用 PID 算法是非常可取的一种方案。PID 是比例积分微分控制, 比例用来调节系统的响应速度,

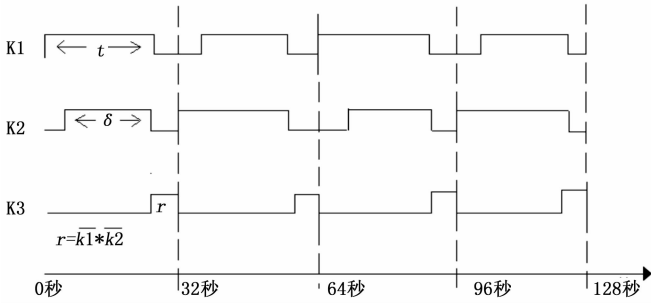


图 6 继电器启停时序图

微分用来稳定系统的散热过程，防止比例系数不当造成的散热过冲或者散热过慢这样的情况，而积分可以准确将系统控制到理想的温度。三者相结合就是非常理想且高效的控制算法^[12]。具体的 PID 温控算法的数学模型如下：

比例算法：

$$P_{out} = (K_p * E_k) + Out0 \quad (1)$$

积分算法：

$$I_{out} = K_p * ((1/T_i) \int E_k dt) + Out0 \quad (2)$$

微分算法：

$$D_{out} = K_p * (T_d (de/dt)) + Out0 \quad (3)$$

其中， E_k 为最近一次采样温度值与系统温度设定值之间的差值， K_p 是比例因子， T_i 是积分时间常数， T_d 叫微分时间常数， $Out0$ 为一非零常数，作用是为了保证无论何时系统都会有输出值而避免失控。由此得到 PID 算法的数学模型：

$$OUT = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (4)$$

将上述公式 (1) (2) (3) 中的 $Out0$ 合并记为 $OUT0$ ，得到：

$$OUT = K_p * (E_k + (1/T_i) * \int E_k dt + T_d * (de/dt)) + OUT0 \quad (5)$$

OUT 即为 PID 温控算法的结果，通过 OUT 产生应的控制信号来控制 PWM 信号的宽度，进而来控制继电器，最终实现对系统的制冷控制。

PID 算法其中最重要的是系统是闭环的，温度数据是算法的数据，并且温度数据也是系统的反馈，在运放中，反馈可以做出比较理想的放大器，而在控制理论中，反馈同样适用。有了输入，然后与想要的理想温度值作对比，得出系统的误差 e ，之后误差 e 送入 PID 控制器中，经过运算得出输出，然后根据输出来控制电风扇的转速降温或者是控制制冷片的制冷^[13]，框图如 7 所示。

4 系统测试与分析

4.1 温度采集测试

温度的采集与调试是系统调试环节中必不可少的一部分，温度采集模块周期发送温度数据到 STM32，然后经由 STM32 解算出当前温度值。模块输出的串口数据是周期性

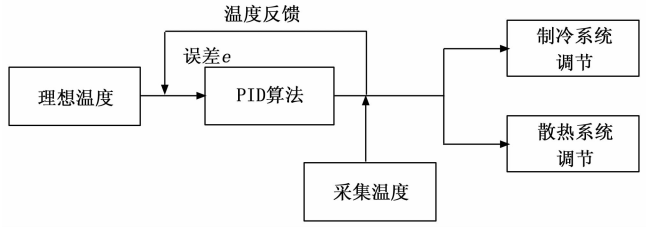


图 7 PID 温度调节原理图

的，而实际仪器内部具有当前温度显示的指示，将温度串口模块输出的信息通过 PC 端的串口调试助手显示出来，可以看到经过自定义的协议处理后的串口数据，如图 8 所示，而 STM32 之后就每 10 个字节为一包的数据解析出来，做温控算法。



图 8 上位机温度数据

4.2 整体系统测试

根据 3.1 中介绍，该半导体冰箱系统共有 3 种制冷强度，设计和调试完成后，为了验证设计效果，分别在环境温度 27℃ 左右的条件下选择低档和中档进行了两次测试：

1) 低档、设置恒定温度为 19℃：结果如图 9 所示，从测试结果可以看出，温度稳定时，箱内温度基本恒定在 19℃ 左右，上下浮动不超过 0.5 度，并且达到设定温度的时间大约为 2 小时，与上述 3.1 所描述时间相符合。

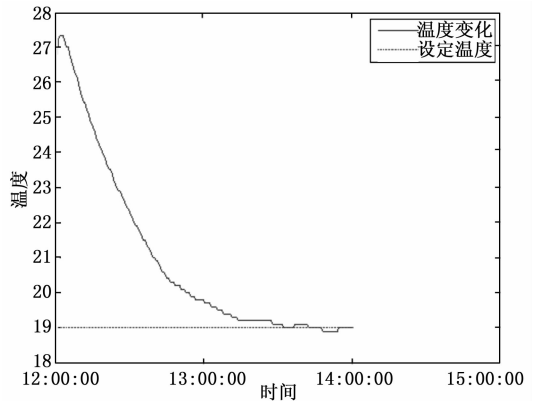


图 9 低档、恒定温度为 19℃ 时的温度曲线

2) 中档、设置恒定温度为 15℃：结果如图 10 所示，从测试结果可以看出，温度稳定时，箱内温度基本恒定在 15℃ 左右，上下浮动不超过 0.5 度，并且达到设定温度的

时间大约为 1 小时, 同样与上述 3.1 所描述时间相符合。

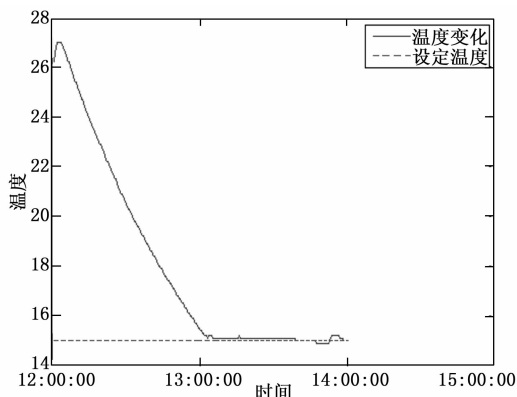


图 10 中档、恒定温度为 15 °C 时的温度曲线

5 结束语

在进行该冰箱系统的整体设计之前, 给出了系统核心组件即制冷加热模块的两种设计方案: 半导体+散热风扇和压缩机+辅助电加热, 经过两者的优缺点对比分析, 最终选择了半导体加散热风扇的组合方式。经过实验室多次的实验, 该半导体冰箱系统可以连续稳定的运行, 设置好恒定值和制冷强度之后, 系统可以在工作一段时间后最终使温度稳定在所设置的恒定值附近, 上下浮动范围不超过 0.5 °C, 并且所用时间符合预期时间, 成功的实现了所设计系统的预期功能。该半导体冰箱系统可以用在日常生活的各个方面, 比如: 快餐派送, 断电保温和疫苗派送等等, 给人们的生活带来极大的帮助和便利。

(上接第 84 页)

4 结束语

本文利用盲源分离方法, 从球磨机混合噪声中提取出了有效的磨音信号; 通过 EMD 分析、相关系数准则和 IMF 能量的判别熵准则, 从磨音信号中提取了有效的 IMF; 最终找到了空磨、正常磨和饱磨下的有效 IMF 能量的范围, 并得出磨音有效 IMF 能量随料球比增加而降低的结论。实验结果表明用本文方法得到的磨机料球比和真实料球比基本一致, 验证了料球比模型的可行性和有效性, 为基于磨音的磨机负荷检测方法提供的新思路。

参考文献:

- [1] 汤健, 赵立杰, 岳恒, 等. 磨机负荷检测方法研究综述 [J]. 控制工程, 2010, 17 (5): 565-570.
- [2] 张杰, 王建民, 杨志刚, 等. 基于功率谱分析的球磨机负荷模型 [J]. 工矿自动化, 2013, 39 (12): 43-47.
- [3] 司刚全, 曹晖, 王靖程, 等. 基于复合式神经网络的火电厂筒式钢球磨机负荷软测量 [J]. 热力发电, 2007, 36 (5): 64-67.
- [4] 张莲, 陈丽. 磨音检测与处理方法研究 [J]. 控制工程,

参考文献:

- [1] 鄢红春, 周骏, 方大群. “卡诺循环”教学中的潜科学分析 [J]. 物理与工程, 2003, 13 (6): 44-45.
- [2] 陈良深, 陈天宇, 詹杨, 等. 基于半导体制冷的冰箱制冷效率提高的研究 [J]. 中国高新技术企业, 2013, (29): 20-22.
- [3] 张晓芳, 钟建新, 杨穗. 水冷式半导体冰箱制冷性能的研究 [J]. 工程设计学报, 2012, 19 (2): 105-111.
- [4] 邹焯导, 吕恩利, 陆华忠, 等. 半导体制冷式果蔬配送箱控制系统 [J]. 食品与机械, 2017, 33 (1): 128-132.
- [5] 吴正业. 小型制冷装置设计指导 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 欧少敏. 基于 TL494 的推挽式开关电源设计 [J]. 通信电源技术, 2017, 34 (2): 78-79.
- [7] 孙建民, 杨清梅. 传感器技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 程德福. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 强锡富. 传感器 (第 3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] Lang Jun, Tao Ran, Ran Qiwen, et al. The multiple-parameter fractional Fourier transform [J]. Science in China, 2008, 51 (8): 1010.
- [11] Stuart Bennett. The past of PID controller [J]. Annual Reviews in Control, 2001, 25: 43-53.
- [12] 刘建东, 张栾英, 谷俊杰. 数字 PID 控制系统的鲁棒性分析与设计 [J]. 华北电力大学学报, 2003, 30 (6): 31-33.
- [13] 张卫东. PID 控制器自整定技术的发展 [Z]. 2002 年世界控制大会总结报, 2002.
- [1] 孙丽华, 曲莹军, 张彦斌, 等. 钢球磨煤机负荷检测方法的研究及实现 [J]. 热力发电, 2004, 33 (11): 25-27.
- [2] 王飞, 李智勇, 朱强. 基于自适应阈值小波分析的磨音信号去噪 [J]. 矿山机械, 2015 (12): 76-79.
- [3] 汤健, 赵立杰, 岳恒, 等. 基于多源数据特征融合的球磨机负荷软测量 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2010, 44 (7): 1406-1413.
- [4] 林凤涛, 陈明奎. 二阶统计量的盲源分离研究 [J]. 噪声与振动控制, 2008, 28 (2): 7-9.
- [5] 马庆涛. 球磨机噪声治理方案研究与应用 [J]. 通用机械, 2015 (2): 57-61.
- [6] 李舜酩. 振动信号的盲源分离技术及应用 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [7] 汤健, 柴天佑, 丛秋梅, 等. 基于 EMD 和选择性集成学习算法的磨机负荷参数软测量 [J]. 自动化学报, 2014, 40 (9): 1853-1866.
- [8] 丁常富, 蔡志成. EMD 中有效 IMF 选取方法的研究 [J]. 热力发电, 2014, 43 (1): 36-40.
- [9] 李茹, 张建伟. 基于 IMF 解析信号能量熵的人脸表情特征提取方法磁 [J]. 计算机与数字工程, 2016, 44 (3): 529-532.